

深水重力流沉积类型及含油性对比

——以鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长7—长9油层组为例

王琳茜^{1,2},赵靖舟^{1,2},高振东³,魏繁荣³,周世琪^{1,2},孟选刚³,闫新智³,徐宁³

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065;2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室,陕西 西安 710065;3. 延长油田股份有限公司,陕西 延安 716000)

摘要:三叠系延长组7—9油层组(长7—长9油层组)是鄂尔多斯盆地富县地区石油资源潜力较大的层系,以往研究多认为该套地层的砂岩主要为三角洲沉积,近年研究虽然在长7油层组发现了重力流沉积,但长7—长9油层组是否都有重力流沉积及其分布范围如何仍不清楚。综合岩心观察、粒度分析和薄片观察等手段,判识重力流沉积的主要类型及其分布,并对不同类型重力流沉积的储层特征与含油性进行对比分析,结果显示:①富县地区长7—长9油层组普遍发育重力流沉积,包括砂质碎屑流沉积、浊流沉积和滑动-滑塌沉积3种类型。其中砂质碎屑流沉积砂体厚度较大,发育块状层理,可见泥岩撕裂屑,概率累积曲线主要为偏粗的一段式、短尾两段式和悬浮组分含量较高的两段式;浊流沉积较薄,岩心中可观察到不完整鲍玛序列,概率累积曲线主要为偏细的一段式;滑动-滑塌沉积以揉皱变形、包卷层理和阶梯状断层为特征。②砂质碎屑流沉积普遍优于浊流沉积,具有储层品质佳、含油性好和试油产量高等特征。③富县地区长7—长9油层组普遍发育重力流沉积,砂质碎屑流沉积最为发育,其储层物性和含油性也最好,建议作为今后该地区致密油勘探开发的主要目标。

关键词:含油性;砂质碎屑流沉积;浊流沉积;滑动-滑塌沉积;重力流沉积;富县地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Types of deep-water gravity-flow deposits and comparison of their oil-bearing properties: A case study of the 7th-9th oil groups in the Triassic Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin

WANG Linxi^{1,2}, ZHAO Jingzhou^{1,2}, GAO Zhendong³, WEI Fanrong³, ZHOU Shiqi^{1,2},
MENG Xuangang³, YAN Xinzhi³, XU Ning³,

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Yanchang Oil Field Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: In the Fuxian area of the Ordos Basin, the 7th-9th oil groups in the Triassic Yanchang Formation (also referred to as the Chang 7-9 oil groups) hold great petroleum resource potential. Previous studies mostly hold that sandstones in these oil groups are dominated by deltaic deposits. Although gravity-flow deposits have been discovered in the Chang 7 oil group in recent years, some issues remain unclear, including their existence and distribution range across the Chang 7-9 oil groups. Using core observations, grain size analysis, and thin section observations, we identify the primary types of gravity-flow deposits and their distributions, together with the comparison of reservoir characteristics and oil-bearing properties within. The results indicate that gravity-flow deposits are widely distributed across the Chang 7-9 oil groups in the Fuxian area, including sandy debris-flow deposits, turbidite-flow deposits, and slide-slump deposits. The sandy debris-flow deposits, among others, feature great thicknesses and massive beddings, with rip-up clasts visible. Their grain-size cumulative probability curves exhibit three primary patterns: a coarse-skewed single-segment pattern, a short-tailed two-segment pattern, and a two-segment pattern with high suspended component

收稿日期:2025-06-17;修回日期:2025-08-14。

第一作者简介:王琳茜(2002—),女,硕士研究生,地质资源与地质工程。E-mail: 1474153226@qq.com。

通信作者简介:赵靖舟(1962—),男,教授,油气成藏与非常规油气地质学。E-mail: jzzhao@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05050)。

content. In contrast, the turbidite-flow deposits are thin, with incomplete Bouma sequences observable in cores. Their grain-size cumulative probability curves primarily show a fine-skewed single-segment pattern. In contrast, the slide-slump deposits are characterized by wrinkling deformation, convolute beddings, and stepped faults. The comparison reveals that the sandy debris-flow deposits are generally superior to the turbidite-flow deposits, exhibiting high reservoir quality, favorable oil-bearing properties, and high daily oil production from well tests. Among the widespread gravity-flow deposits in the Chang 7–9 oil groups in the Fuxian area, the sandy debris-flow deposits show the most extensive distribution, as well as the most favorable reservoir physical properties and oil-bearing properties. Therefore, they should be prioritized as significant targets for future exploration and development of tight oil in the Fuxian area.

Key words: oil-bearing property, sandy debris-flow deposits, turbidite-flow deposits, slide-slump deposits, gravity-flow deposits, Fuxian area, Ordos Basin

引用格式:王琳茜,赵靖舟,高振东,等. 深水重力流沉积类型及含油性对比——以鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长7—长9油层组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1504–1521. DOI: 10. 11743/ogg20250508.

WANG Linxi, ZHAO Jingzhou, GAO Zhendong, et al. Types of deep-water gravity-flow deposits and comparison of their oil-bearing properties: A case study of the 7th-9th oil groups in the Triassic Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1504–1521. DOI: 10. 11743/ogg20250508.

自1950年Kuenen和Migliorini^[1]通过水槽实验首次证实了浊流的存在以来, Bouma于20世纪60年代提出了经典的Bouma(鲍马)序列^[2]; Middleton^[3]根据颗粒支撑机理将重力流划分为碎屑流、颗粒流、液化流和浊流4种类型; Lowe^[4]根据流体性质将浊流分为高密度浊流和低密度浊流; 到90年代, Shanmugam^[5]提出了砂质碎屑流沉积的概念, 并认为高密度浊流本质为砂质碎屑流, 这种说法受到许多学者关注^[6–8]。除此之外, 异重流和超临界流的提出也引起了部分学者的注意^[9–10]。近年来, 中国学者在陆相湖盆重力流研究中取得了重要进展, 各大陆相盆地均发现了重力流沉积。如松辽盆地青山口组发现大规模分布的槽谷重力流和断坑重力流沉积^[11], 嫩江组一段湖盆深水斜坡上发育重力流水道^[12]; 渤海海域辽中凹陷东营组三段存在重力流沉积^[13]。另外, 重力流的物理模拟和数值模拟技术也取得了进展^[14]。

鄂尔多斯盆地作为中国最富油气的盆地之一, 其主要含油层系三叠系延长组的沉积相研究一直受到关注, 特别是作为致密油与页岩油主要勘探开发目的层的延长组下组合中的延长组7—9油层组(长7—长9油层组)。但目前关于延长组下组合沉积相研究的报道主要集中在西南物源控制的陇东地区, 尤其对长7油层组的研究最多。孙宁亮等^[15]认为盆地南部长6油层组和长7油层组发育重力流沉积, 包括砂质碎屑流沉积、浊流沉积和泥质碎屑流沉积; 冉逸轩和周翔^[16]在盆地西南部长6油层组发现了重力流沉积; 祝海华等^[17]提出盆地西南部长7油层组存在重力流沉积; 徐黎明等^[18]认为华池地区长7³油层亚组存在重力流沉积; 张家强^[19]等发现城页水平井区长7³油层亚组发育

滑动—滑塌、浊流和砂质碎屑流沉积, 其物源来自湖盆西南部三角洲前缘沉积物的失稳滑脱; 张倚安等^[20]认为盆地西南部地区长7油层组重力流沉积主要为砂质碎屑流沉积、低密度浊流沉积和混合事件层3种, 并分析了重力流流体演化的过程; 霍宏亮等^[21]在研究合水地区长7油层组沉积相对成岩作用的影响时, 建立了重力流沉积背景下的致密砂岩储层演化模式; 蒋文琦等^[22]发现陇东地区长7³油层亚组的重力流沉积特征受构造运动、湖床古地貌和坡折角高低的影响。然而, 与长7油层组相比, 长8油层组和长9油层组的沉积研究则相对较少, 且多认为其以三角洲前缘沉积为主^[23–24]。

与西南物源控制的陇东地区相比, 对主要受东北物源控制的陕北地区长7—长9油层组沉积相研究的报道则更少。近年来, 随着对延长组下组合致密油与页岩油勘探开发的不断重视, 对该区长7油层组砂岩沉积相的研究取得了重要进展。王林等^[25]提出鄂尔多斯盆地盐池、定边和吴起一带长7油层组发育砂质碎屑流—浊流混合成因沉积与浊流沉积2种类型; 张龙飞等^[26]发现吴起一定边地区长7油层组存在重力流沉积, 包括砂质碎屑流沉积和浊流沉积。但有关本文研究区陕北富县地区长7油层组砂岩的沉积相认识还存在明显分歧。一些学者认为富县地区长7油层组主要发育三角洲沉积^[27–28]; 陈飞等^[29]提出富县地区长6—长9油层组存在砂质碎屑流沉积; 田媛等^[30]则认为富县地区延长组广泛发育震积岩; 张军等^[31]近期亦在富县地区长7油层组发现了重力流沉积, 包括砂质碎屑流沉积、浊流沉积和滑动—滑塌沉积; 周世琪^[32]认为富县地区长8—长9油层组存在重力流沉积。

在研究方法方面,目前对沉积相的判识研究主要是基于野外露头 and 岩心观察,而在粒度研究方面较为薄弱,特别是对于粒度资料能否用于区别不同的重力流沉积类型,现有的教科书^[33]和过往的研究深入讨论的较少,大多只对重力流沉积的粒度特征做了统一性论述^[19,29,34],并未就不同重力流沉积类型(如砂质碎屑流和浊流沉积)的粒度特征进行分析总结。

鉴于富县地区延长组下组合长7—长9油层组重要的勘探开发意义以及目前对其砂体沉积成因认识的分歧,本文基于11口井岩心的厘米级观察、58口井62个样品的粒度资料分析和11口井45个样品的薄片观察等综合研究,对研究区长7—长9油层组的沉积相特征进行了系统研究,在长7油层组、长8油层组和长9油层组均发现了广泛分布的重力流沉积,并探讨了该区重力流沉积平面和剖面上的分布特征及其对储层和含油性的控制作用,为该区的致密油与页岩油勘探开发提供了依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是一个多旋回大型克拉通盆地,具有稳定沉降、拗陷迁移和构造简单等特点^[35]。盆地内部分为6个一级构造单元,分别为伊盟隆起、伊陕斜坡、天环拗陷、西缘冲断带、晋西挠褶带和渭北隆

起^[36]。主要含油层系为三叠系延长组,自上而下分为长1—长10共10个油层组,其中长7—长10油层组常称为延长组下组合,其与长6油层组等一起构成了延长组致密油与页岩油富集的主要层系。本文主要研究长7—长9油层组,其中长7油层组可划分为长7¹、长7²和长7³油层亚组,长8油层组可分为长8¹和长8²油层亚组,长9油层组可分为长9¹和长9²油层亚组。前人研究表明,鄂尔多斯盆地延长组致密油资源十分丰富,预测资源总量为 30×10^8 t,长6—长8油层组为主要的致密油勘探层位^[37]。随着致密油勘探开发的不断深入,富县地区也展示出了较大的勘探潜力^[38]。

富县地区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡南部的富县境内(图1),东依黄龙山系与宜川县和洛川县接壤,西靠子午岭与甘肃省合水县和宁县相邻,南接隆坊塬与黄陵县,北以丘陵沟壑与志丹县、甘泉县和宝塔区相接,县域面积4 182 km²。已发现含油层系有长8油层组、长7油层组、长6油层组和长2油层组等,主力产油层系为长8油层组和长2油层组。烃源岩主要为长7油层组泥页岩,其分布面积大、生烃能力强^[39]。另外,长9油层组顶部还发育一套优质烃源岩——李家畔页岩,是研究区另一套重要的烃源岩。上述2套烃源岩同时也是研究区优质区域盖层。优越的烃源条件和良好的生-储-盖组合决定了富县地区长7—长9油层组具有较大的勘探开发潜力。

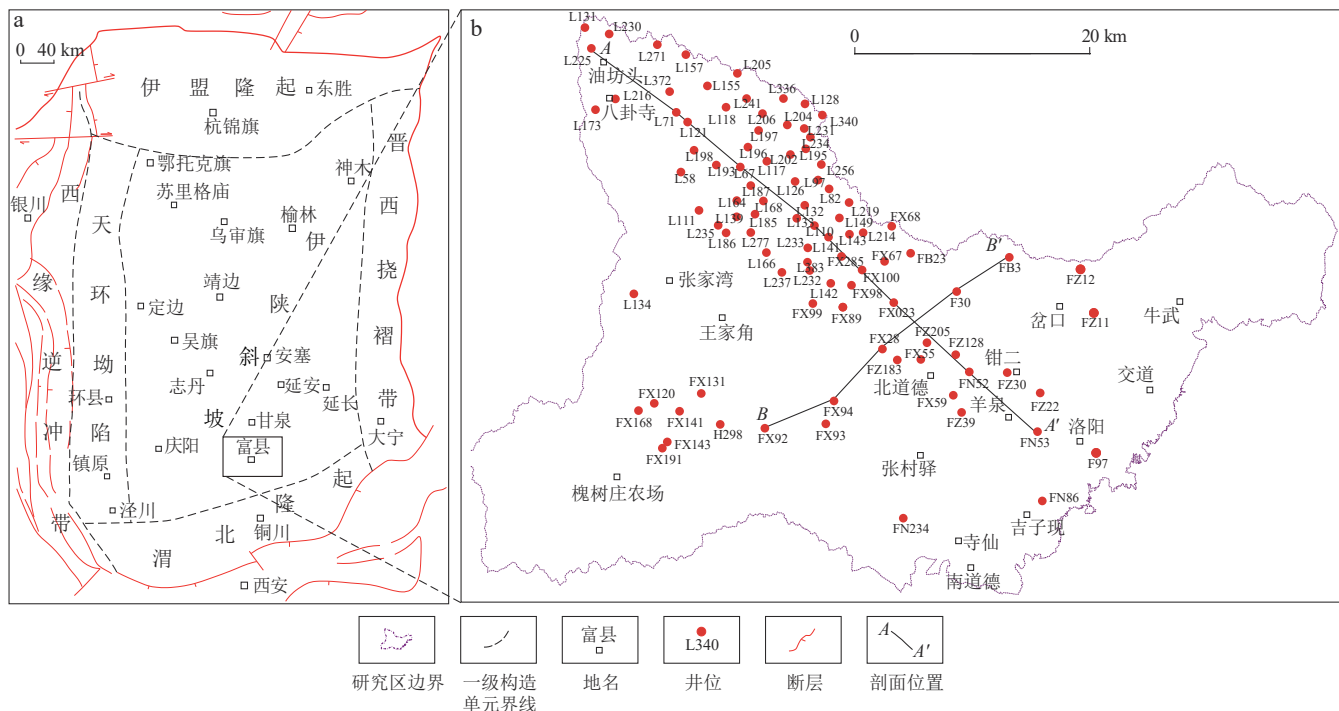


图1 鄂尔多斯盆地富县地区构造位置(a)及井位分布(b)

Fig. 1 Tectonic location (a) and well distribution (b) of the Fuxian area, Ordos Basin

2 重力流沉积类型及其特征

综合岩心观察、粒度分析和薄片观察等研究发现,富县地区长7—长9油层组重力流沉积十分普遍,可识别出3种深水重力流沉积:砂质碎屑流、浊流和滑动—滑塌沉积。

2.1 岩心特征

2.1.1 砂质碎屑流沉积

根据岩心观察,研究区可见砂质碎屑流沉积的典型特征:块状层理发育,是最主要的特征(图2a—h);砂体厚度一般较大,单砂层厚度大于0.5 m,通常可达数米到十余米;还可观察到漂浮泥砾(图2i);沉积物粒度变化大,粒度总体较浊流沉积粗。

2.1.2 浊流沉积

浊流是一种在水体底部形成的高速紊流状态的混合流体^[40]。在高速运移阶段,泥—砂颗粒通过流体

湍动能维持悬浮状态;随着能量衰减,颗粒发生非稳态沉降,导致沉积物分选性变差且层理界面模糊,该过程伴随流体性质的快速转变^[41]。浊流沉积厚度一般较小,单砂层厚度通常小于0.5 m,但由于多期叠加,可形成数米厚的连续砂层。岩心上可见鲍玛序列和高频的砂—泥韵律互层(图3),鲍马序列一般保存不完整。

2.1.3 滑动—滑塌沉积

滑动—滑塌沉积指沉积物垮塌再搬运过程中沿不连续剪切面崩塌形成的不同搬运状态的塑性连续块体^[42],为研究区长7—长9油层组重力流沉积体系的重要组成部分。岩心观察可见近顺层展布的滑动破裂面(图4a),局部可见砂质注入体(图4b)。发育揉皱变形构造和包卷层理(图4c—i),反映差异剪切应力作用下的准同生变形。还可观察到阶梯状断层,断距为0.5 ~ 1.5 cm(图4j)。

2.2 粒度特征

粒度资料是判识沉积环境的重要依据之一。以往有研究认为砂质碎屑流沉积概率累积曲线具有明显的



图2 富县地区长7—长9油层组砂质碎屑流沉积典型岩心照片(a—d,i图引自文献[31])

Fig. 2 Core photos of sandy debris-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area (Fig. 2 a—d and i from reference [31])

a. 砂岩,块状层理,FX191井,埋深1 548.95 ~ 1 549.05 m,长7²油层亚组;b. 砂岩,块状层理,L241井,埋深1 549.76 ~ 1 550.16 m,长7²油层亚组;c. 砂岩,块状层理,L230井,埋深1 787.00 m,长7¹油层亚组;d. 砂岩,块状层理,L256井,埋深1 305.35 ~ 1 305.58 m,长7¹油层亚组;e. 砂岩,块状层理,L271井,埋深1 861.80 m,长8¹油层亚组;f. 砂岩,块状层理,L234井,埋深1 732.80 ~ 1 733.03 m,长8²油层亚组;g. 砂岩,块状层理,下部有平行层理,L234井,埋深1 736.07 ~ 1 736.18 m,长8²油层亚组;h. 砂岩,块状层理,L277井,埋深1 562.45 m,长9¹油层亚组;i. 泥质粉砂岩,漂浮泥砾,FX191井,埋深1 568.10 ~ 1 568.30 m,长7²油层亚组

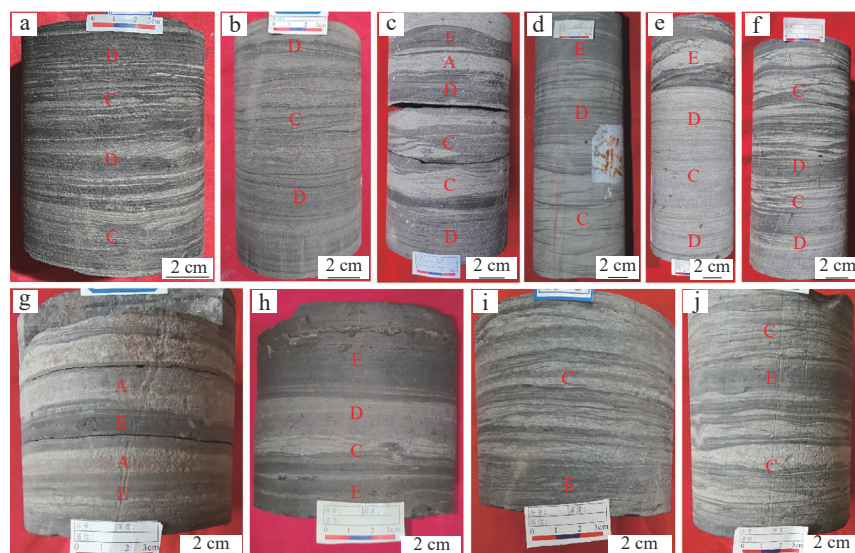


图3 富县地区长7—长9油层组浊流沉积典型岩心照片(a,b图引自文献[31])

Fig. 3 Core photos of turbidite-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area (Fig. 3a and b from reference [31])

a. 泥质粉砂岩,鲍玛序列,L230井,埋深1 789.68 m,长7¹油层亚组;b. 泥质粉砂岩,鲍玛序列,L256井,埋深1 288.02 ~ 1 288.22 m,长7¹油层亚组;c. 泥质粉砂岩,鲍玛序列,L277井,埋深1 510.23 ~ 1 510.43 m,长8²油层亚组;d. 灰色泥质粉砂岩,下部发育交错层理,上部为鲍玛序列,L241井,埋深1 692.23 m,长8²油层亚组;e. 细砂岩,鲍玛序列,顶部有泥岩,下部发育平行层理,L372井,埋深1 777.51 m,长9¹油层亚组;f. 细砂岩,鲍玛序列,L372井,埋深1 782.18 m,长9¹油层亚组;g. 粉砂质泥岩,鲍玛序列,L234井,埋深1 799.94 m,长9¹油层亚组;h. 泥质粉砂岩,鲍玛序列,L225井,埋深1 804.22 m,长9¹油层亚组;i. 粉砂质泥岩,鲍玛序列,L235井,埋深1 537.65 m,长9¹油层亚组;j. 粉砂质泥岩,鲍玛序列,L234井,埋深1 799.84 m,长9¹油层亚组(A为块状、粒序层;C为波状纹层;D为上平行纹层;E为远洋深水沉积的页岩或泥岩。)

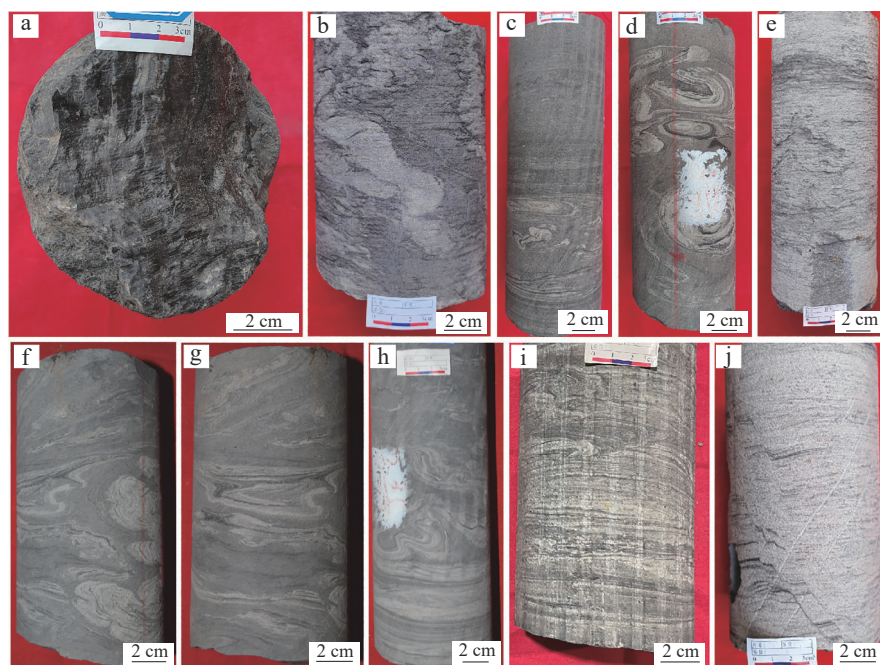


图4 富县地区长7—长9油层组滑动-滑塌沉积典型岩心照片(a,c和d图引自文献[31])

Fig. 4 Core photos of slide-slump deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area (Fig. 4a, c, and d from reference [31])

a. 粉砂质泥岩,滑动面,FX191井,埋深1 569.60 ~ 1 569.70 m,长7²油层亚组;b. 粉砂质泥岩,砂质注入体,L277井,埋深1 511.01 ~ 1 511.36 m,长8²油层亚组;c. 粉砂质泥岩,包卷层理,L241井,埋深1 560.70 ~ 1 560.96 m,长7²油层亚组;d. 粉砂质泥岩,包卷层理和变形构造,L241井,埋深1 561.90 ~ 1 562.26 m,长7²油层亚组;e. 粉砂质泥岩,变形构造,L277井,埋深1 532.38 m,长8²油层亚组;f. 泥质粉砂岩,球枕状构造和包卷层理,L241井,埋深1 691.36 m,长8²油层亚组;g. 泥质粉砂岩,球枕状构造和包卷层理,L241井,埋深1 691.36 m,长8²油层亚组;h. 泥质粉砂岩,包卷层理,L241井,埋深1 690.39 m,长8²油层亚组;i. 泥质粉砂岩,变形构造,L383井,埋深1 549.07 m,长9¹油层亚组;j. 泥质粉砂岩,发育正断层,L241井,埋深1 683.96 ~ 1 684.29 m,长8²油层亚组

两段式,反映牵引流特征;而浊流沉积则为单段式,反映重力流特征^[43]。

为了对不同类型重力流沉积进行判识,本文对同一砂体的岩心和粒度资料进行了对应分析(图5),发现研究区以块状层理为特征的砂质碎屑流沉积,其粒度概率累积曲线主要为短尾二段式和偏粗一段式(图5a₂,b₂);而浊流沉积岩心对应的粒度概率累积曲线主要为偏细一段式(图5c₂,d₂)。前者粒度概率累积曲线的起始端粒径 Φ 值范围为1.00~3.00,平均值为3.37;后者的起始端粒径 Φ 值 ≥ 3.00 ,平均值为3.97,较砂质碎屑流沉积细。需要说明的是,本文所用的粒度资料均为薄片粒度分析法所获得,对致密砂岩来说,薄片粒度分析比筛析法更为准确,因而是目前致密砂岩粒度分析的通用方法。

2.2.1 砂质碎屑流沉积

通过对58口井62个样品粒度资料进行统计分析发现,研究区长7油层组砂质碎屑流沉积主要为偏粗短尾两段式和高悬浮组分两段式(图6a),长8油层组砂质碎屑流沉积主要为偏粗一段式和偏粗短尾两段式

(图6b),长9油层组砂质碎屑流沉积主要为偏粗短尾两段式(图6c),各粒度概率累积曲线特征如下。

①偏粗短尾两段式,其粗端粒径 Φ 值为2~3,悬浮次总体和跳跃次总体之间有明显的拐点^[45],以跳跃次总体占绝对多数,多在95%以上;悬浮次总体占比极少,一般小于5%,且其曲线斜率较小到很小,具有短而平的特征,故称短尾两段式。

②偏粗一段式,其粗端粒径 Φ 值分布在1~3,以粉砂质细砂岩为主,分选较好,斜率为50°~60°。

③高悬浮组分两段式(高悬两段式),其特征是跳跃次总体占比较高,一般为70%~80%,悬浮次总体占15%~30%。粗端粒度也偏粗,粒径 Φ 值为2~3。据孙宁亮等^[15]研究发现,具有块状层理的砂质碎屑流沉积存在两段式概率累积曲线,其跳跃次总体一般占70%~80%,斜率为45°~50°;悬浮次总体占整个粒度分布的15%~25%,斜率为20°~25°,这种特征表明砂质碎屑流同时具有牵引流的特征。

对粒度 C 值(粒度概率累积曲线上颗粒含量1%处对应的粒径)和 M 值(粒度概率累积曲线上颗粒含量50%处对应的粒径,即粒度中值)统计发现,砂质碎屑流

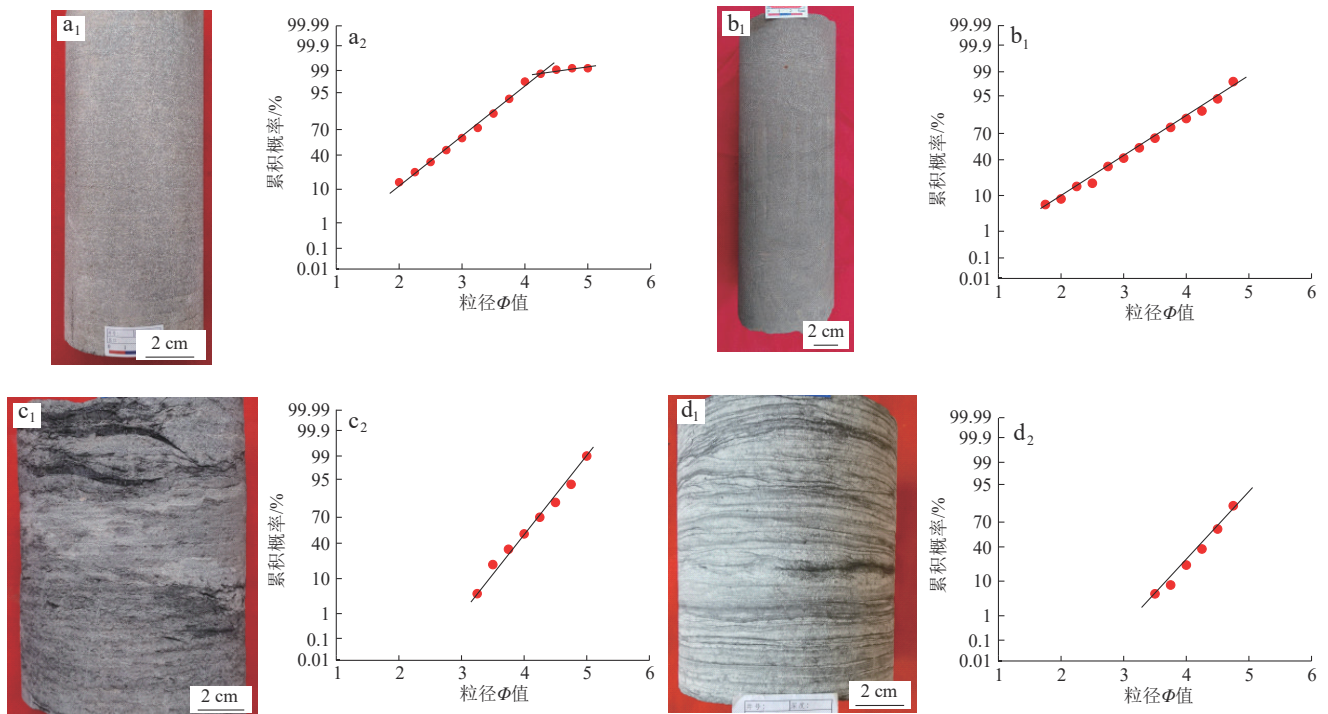


图5 富县地区砂质碎屑流和浊流沉积的岩心照片以及对应粒度概率累积曲线特征(a₁,a₂图引自文献[44])

Fig. 5 Core photos and corresponding grain-size cumulative probability curves of sandy debris-flow deposits and turbidite-flow deposits in the Fuxian area (Fig. 5a₁ and a₂ from reference [44])

a₁. 砂质碎屑流沉积,块状构造,Z198井,埋深1 680.73 m,长8油层组,岩心照片;a₂. a₁图对应概率累积曲线,短尾二段式;b₁. 砂质碎屑流沉积,块状构造,L241井,埋深1 549.00 m,长7油层组,岩心照片;b₂. b₁图对应概率累积曲线,偏粗一段式;c₁. 浊流沉积,鲍玛序列,L277井,埋深1 566.05 m,长9油层组,岩心照片;c₂. c₁图对应概率累积曲线,偏细一段式;d₁. 浊流沉积,含泥质条带,鲍玛序列,L277井,埋深1 514.42 m,长8油层组,岩心照片;d₂. d₁图对应概率累积曲线,偏细一段式

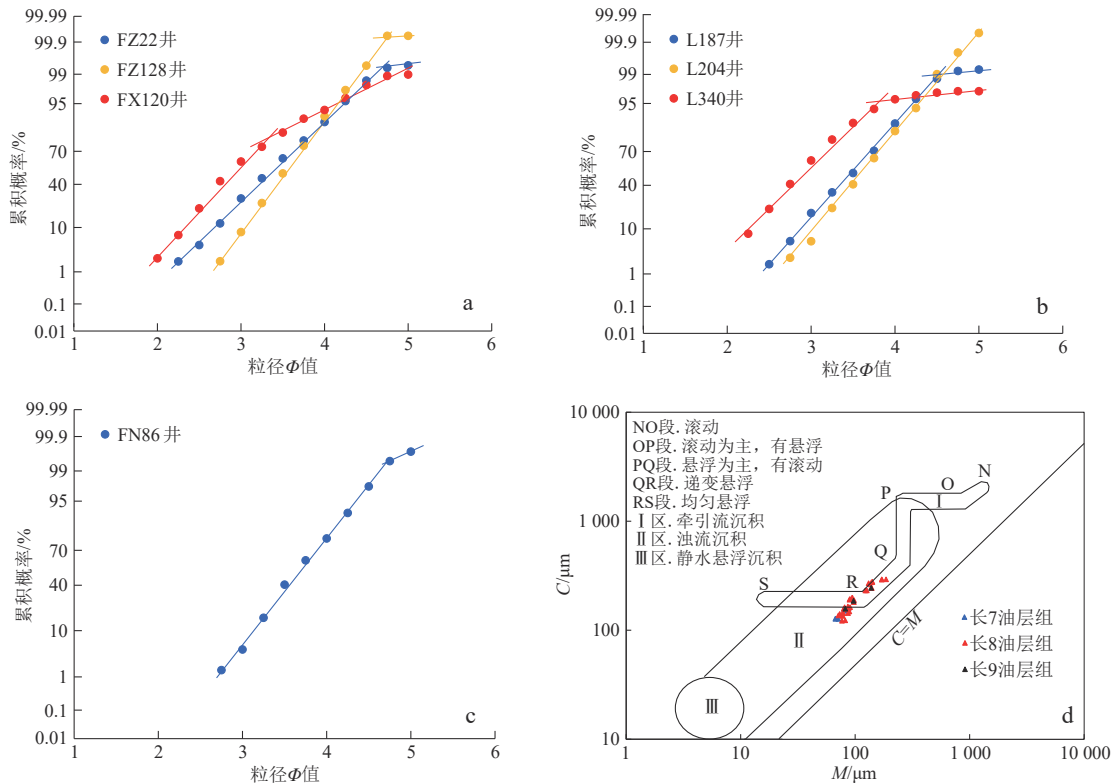


图6 富县地区长7—长9油层组砂质碎屑流沉积粒度概率累积曲线(a—c)及C—M图(d)

Fig. 6 Grain-size cumulative probability curves (a—c) and C—M diagram (d) for sandy debris-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area

(C为粒度概率累积曲线上颗粒含量1%处对应的粒径;M为粒度概率累积曲线上颗粒含量50%处对应的粒径,即粒度中值。)

沉积C值介于122.1~293.1 μm ,平均值为187.9 μm ,M值介于78.7~165.1 μm ,平均值为101.0 μm ,C值与M值的变化范围较大。C—M图上样品数据主要平行C=M基线分布(图6d),反映以递变悬浮沉积为主,为明显的重力流沉积特征。

2.2.2 浊流沉积

富县地区长7—长9油层组浊流沉积的粒度概率累积曲线主要表现为粒度偏细的一段式(图7a—c)。与砂质碎屑流沉积相比,浊流沉积的一段式粗端粒径 Φ 值约为3,沉积物粒度较细,以极细砂岩和粉砂岩为主,分选较好,斜率为 $55^\circ \sim 70^\circ$ 。研究区长7—长9油层组浊流沉积C值介于78.7~165.1 μm 、平均值为114.1 μm ,M值介于50.7~82.5 μm 、平均值为64.4 μm 。C—M图上样品数据点主要平行于C=M基线分布(图7d),表明为重力流沉积。

为了进一步搞清研究区砂质碎屑流与浊流砂体的粒度差异,使用福克和沃德公式^[46]计算了二者的平均粒径、标准偏差、偏度和尖度等粒度参数,并对其进行了对比。结果显示砂质碎屑流碎屑粒径 Φ 值总体较大,平均值为3.37,主要为细砂岩;而浊流沉积的粒径 Φ 值偏小,

平均值为3.97,以极细砂岩和粉砂岩为主。标准偏差主要反映沉积物分选程度^[33],浊流沉积的标准偏差低于砂质碎屑流沉积,表明其分选性好于后者。偏度主要反映粒度分布的不对称程度^[33],砂质碎屑流沉积和浊流沉积均为正偏态,但砂质碎屑流沉积偏度大,平均值达0.36,而浊流沉积的偏度平均值仅0.05,说明前者粒度较后者粗,但分选不及后者。尖度是用来反映粒度频率曲线的尖锐程度^[33],砂质碎屑流沉积尖度平均值为3.39,曲线非常尖锐;浊流沉积尖度平均值为2.86,曲线很尖锐。

2.3 薄片特征

研究区11口井45个样品的铸体薄片的观察结果表明,碎屑颗粒多呈次棱角状—次圆状(图8a—e),少数薄片还可观察到较大的岩屑颗粒(图8f),薄片粒度分析的标准偏差介于0.12~1.05,平均值为0.50,分选较好,镜下可见细粒基质充填于粗颗粒之间,填隙物以泥质为主,局部可见碳酸盐胶结物(图8g—i),反映研究区延长组下组合砂体为快速堆积的产物。结合前述岩心观察和粒度分析,判断其为重力流沉积成因。

表1总结了研究区砂质碎屑流沉积与浊流沉积特

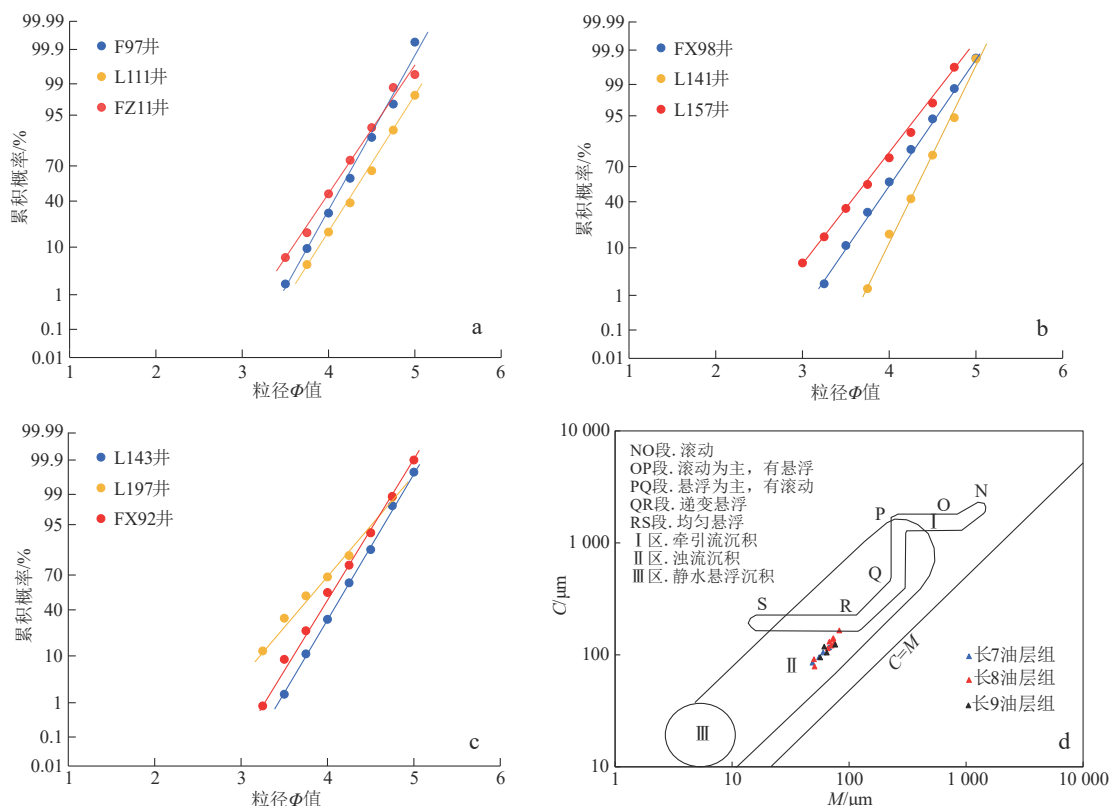


图7 富县地区长7—长9油层组浊流沉积粒度概率累积曲线(a—c)及C—M图(d)

Fig. 7 Grain-size cumulative probability curves (a—c) and C—M diagram (d) for turbidite-flow deposits in the Chang 7–9 oil groups, Fuxian area

(C为粒度概率累积曲线上颗粒含量1%处对应的粒径;M为粒度概率累积曲线上颗粒含量50%处对应的粒径,即粒度中值。)

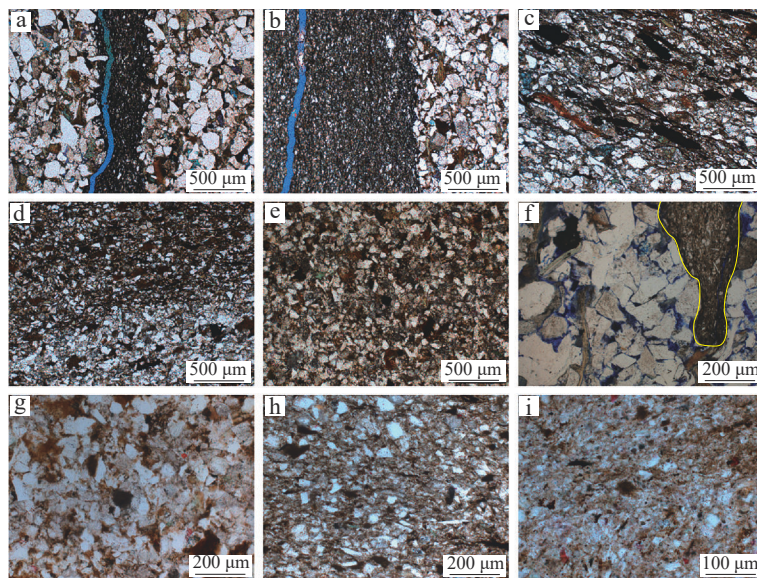


图8 富县地区长7—长9油层组重力流沉积典型铸体薄片显微照片

Fig. 8 Micrographs of casting thin sections of gravity-flow deposits in the Chang 7–9 oil groups, Fuxian area

a. 灰色细砂岩,发育裂缝,颗粒呈次棱角状,浊流,FX168井,埋深1 638.50 m,长7油层组;b. 灰色细砂岩,发育裂缝,颗粒呈次棱角状,浊流,FX168井,埋深1 638.50 m,长7油层组;c. 灰色、深灰色细砂岩,颗粒呈棱角状、定向排列,有长条状的黑云母和岩屑,砂质碎屑流,FX191井,埋深1 547.00 m,长7油层组;d. 泥质粉砂岩,颗粒呈次棱角状,浊流,L256井,埋深1 472.50 m,长9油层组;e. 砂岩,颗粒呈次棱角状,砂质碎屑流,L256井,埋深1 459.67 m,长8油层组;f. 细砂岩,干层,较大的岩屑颗粒,砂质碎屑流,L372井,埋深1 733.12 m,长8油层组;g. 砂岩,填隙物以泥质为主,局部可见碳酸盐胶结物,砂质碎屑流,L256井,埋深1 459.67 m,长8油层组;h. 含泥粉砂岩,油迹,填隙物以泥质为主,局部可见碳酸盐胶结物,砂质碎屑流,L277井,埋深1 566.05 m,长9油层组;i. 含泥粉砂岩,油迹,填隙物以泥质为主,局部可见碳酸盐胶结物,浊流,L231井,埋深1 690.49 m,长9油层组

表1 富县地区砂质碎屑流沉积和浊流沉积特征对比

沉积类型	岩心特征	粒度特征						概率累积 曲线类型	概率累积 曲线起始段 粒径 Φ 值	粒径 Φ 值	薄片特征
		平均 粒径 Φ 值	标准 偏差	$C/\mu\text{m}$	$M/\mu\text{m}$	偏度	尖度				
砂质碎屑流 沉积	块状层理、漂浮泥 砾和泥岩撕裂屑	3.37	0.45	187.9	101.0	0.36	3.39	短尾二段式、一段 式和高悬二段式	2~3	2~5	颗粒次棱角状- 次圆状
浊流沉积	鲍玛序列	3.97	0.36	114.1	64.4	0.05	2.86	一段式	~3	3~5	颗粒次棱角状- 次圆状

征,包括岩心观察特征(沉积构造)、粒度特征和薄片观察特征等的对比。

3 重力流沉积的分布

3.1 单井相及连井剖面对比

结合单井相(图9)和连井剖面对比分析(图10)可知,富县地区长7—长9油层组浊流沉积和砂质碎

屑流沉积最为常见,各重力流沉积在剖面上常具有多期叠置的发育特征。长7—长9油层组均发育砂质碎屑流和浊流沉积,其中,长7油层组和长8油层组以砂质碎屑流沉积为主,砂层连续厚度大、连通性好。

3.2 重力流平面分布特征

钻井岩心观察是准确判定地下重力流沉积分布的首要直接证据,其次是岩心或岩屑的粒度分析。由于

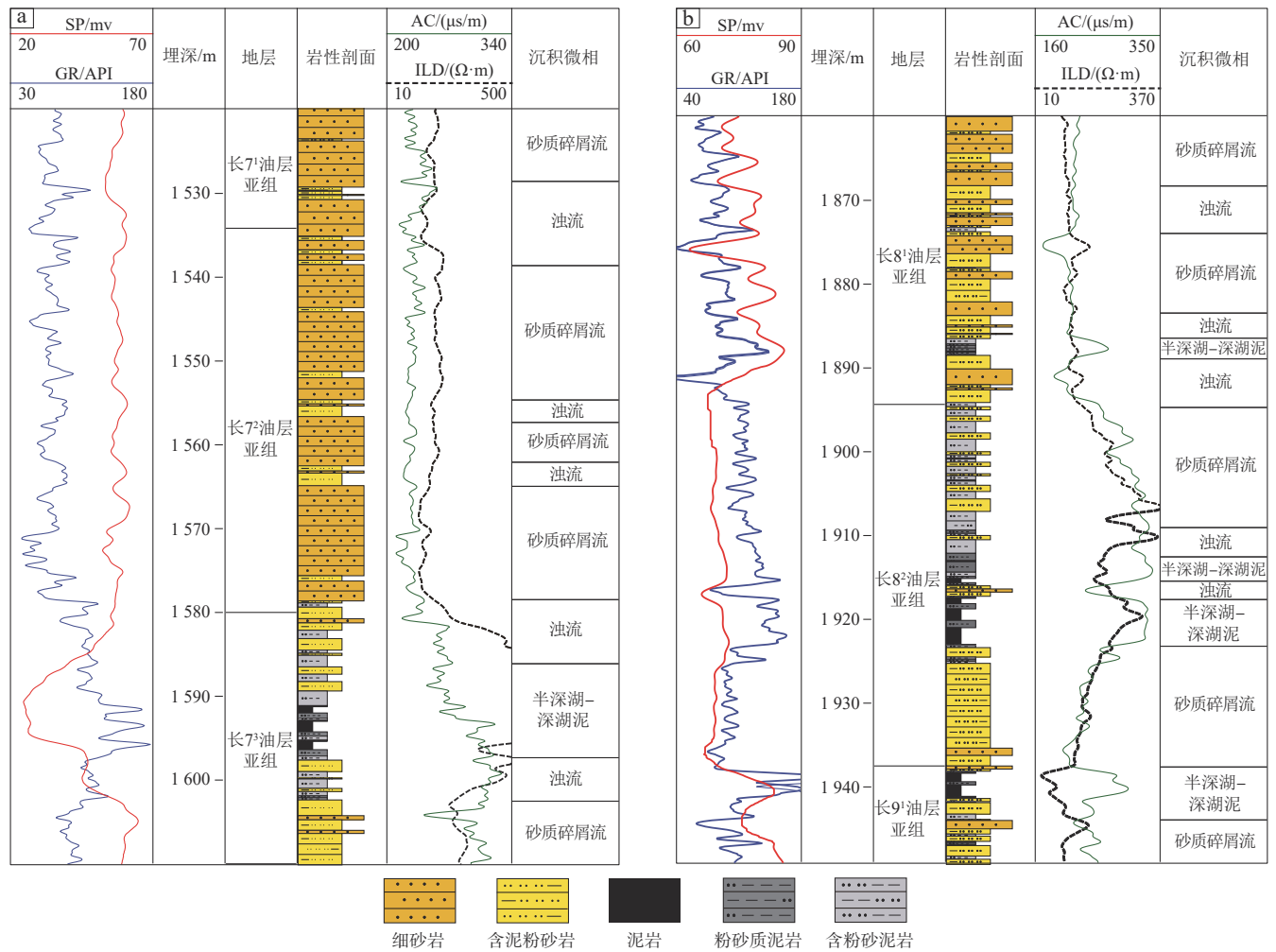


图9 富县地区长7—长9油层组L241井(a)和L271井(b)单井相重力流沉积分布特征

Fig. 9 Distributions of gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups in individual wells L241 (a) and L271 (b), Fuxian area

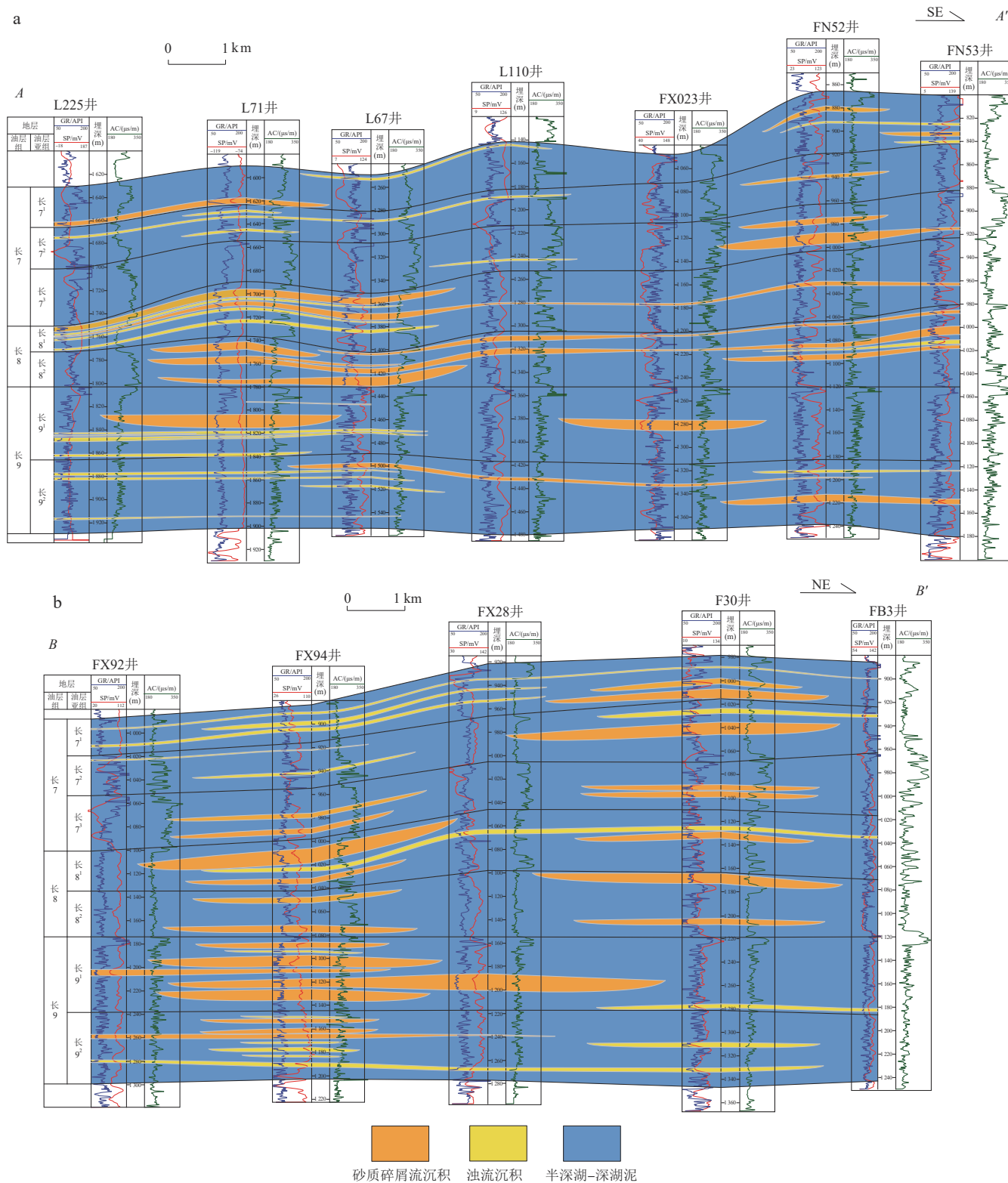


图10 富县地区长7—长9油层组南东向(a)和北东向(b)重力流沉积连井对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 10 S-E (a) and N-E (b) well-correlation sections showing the distribution of gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area (see Fig. 1b for the section locations)

研究区可供岩心观察的资料相对较少,而粒度分析资料比较丰富,且均为岩心薄片粒度分析,加之此次研究

发现粒度资料,特别是粒度概率累积曲线类型特征,可以用来区分砂质碎屑流沉积与浊流沉积。因此,以粒

度资料为主结合单井测井相和连井剖面对比分析,可以得到重力流沉积的平面分布特征。

3.2.1 长7油层组重力流平面分布特征

砂岩粒度概率累积曲线平面分布图(图11)显示,长7油层组概率累积曲线在研究区全区存在一段式、短尾两段式和高悬两段式,并以前两类为主,反映重力流沉积分布遍及全区。其中,偏粗短尾两段式和偏粗一段式分布最多,其粗端粒径 Φ 值分布在2~3,反映其砂质碎屑流沉积占优势。但在研究区东部(如FZ11井和FZ30井)及中-南部(如FZ39井)可见偏细一段式,粗端粒径 Φ 值约为3,反映存在浊流沉积。高悬两段式在长7油层组见FX120井,其特征为:①粗端粒度偏粗,粒径 Φ 值分布在2~3;②跳跃次总体占比相对较低,一般为70%~80%,悬浮次总体占15%~30%。因此,认为这种高悬两段式应为砂质碎屑流沉积。

3.2.2 长8油层组重力流平面分布特征

长8油层组在研究区西南部没有粒度资料,据现有资料分析发现砂岩粒度概率累积曲线形态多样(图12),主要有一段式和短尾两段式2种类型,分布也遍及研究区西北部。短尾两段式和一段式也存在粒度偏粗和偏细两类,偏粗的粗端粒径 Φ 值分布在2~3,偏细的粗端粒径 Φ 值约为3,表明砂质碎屑流与浊流沉积在研究区西北部均有分布。

3.2.3 长9油层组重力流平面分布特征

长9油层组砂岩粒度分析资料较少(图13),据现有资料,认为该层段的砂岩粒度概率累积曲线主要有一段式和短尾两段式2种类型,且均存在粒度偏粗和偏细2种类型,偏粗的粗端粒径 Φ 值分布在2~3,偏细的粗端粒径 Φ 值约为3,一段式以偏细型为主。

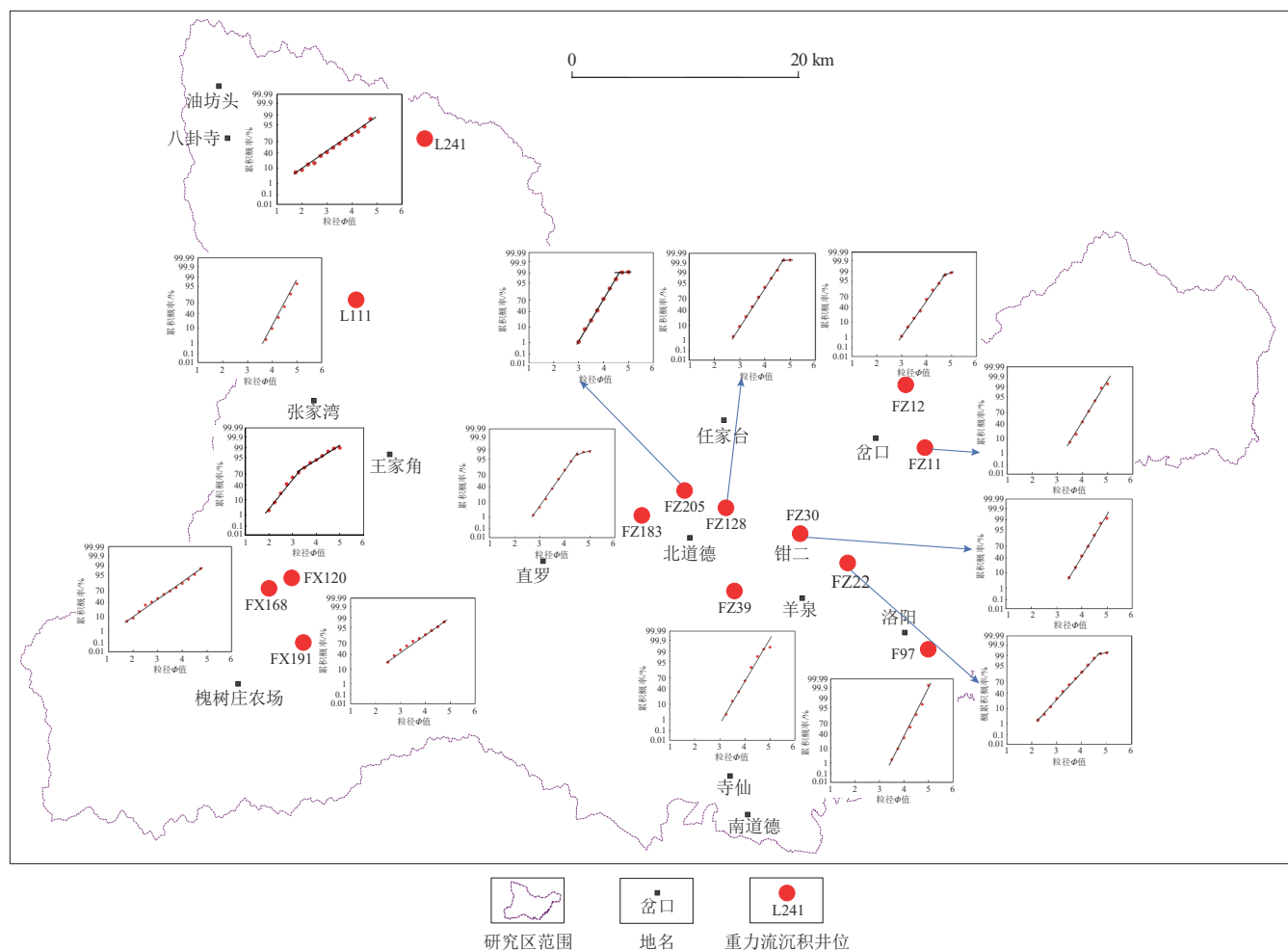


图11 富县地区长7油层组重力流沉积概率累积曲线平面分布

Fig. 11 Map of grain-size cumulative probability curves for gravity-flow deposits in the Chang 7 oil group, Fuxian area

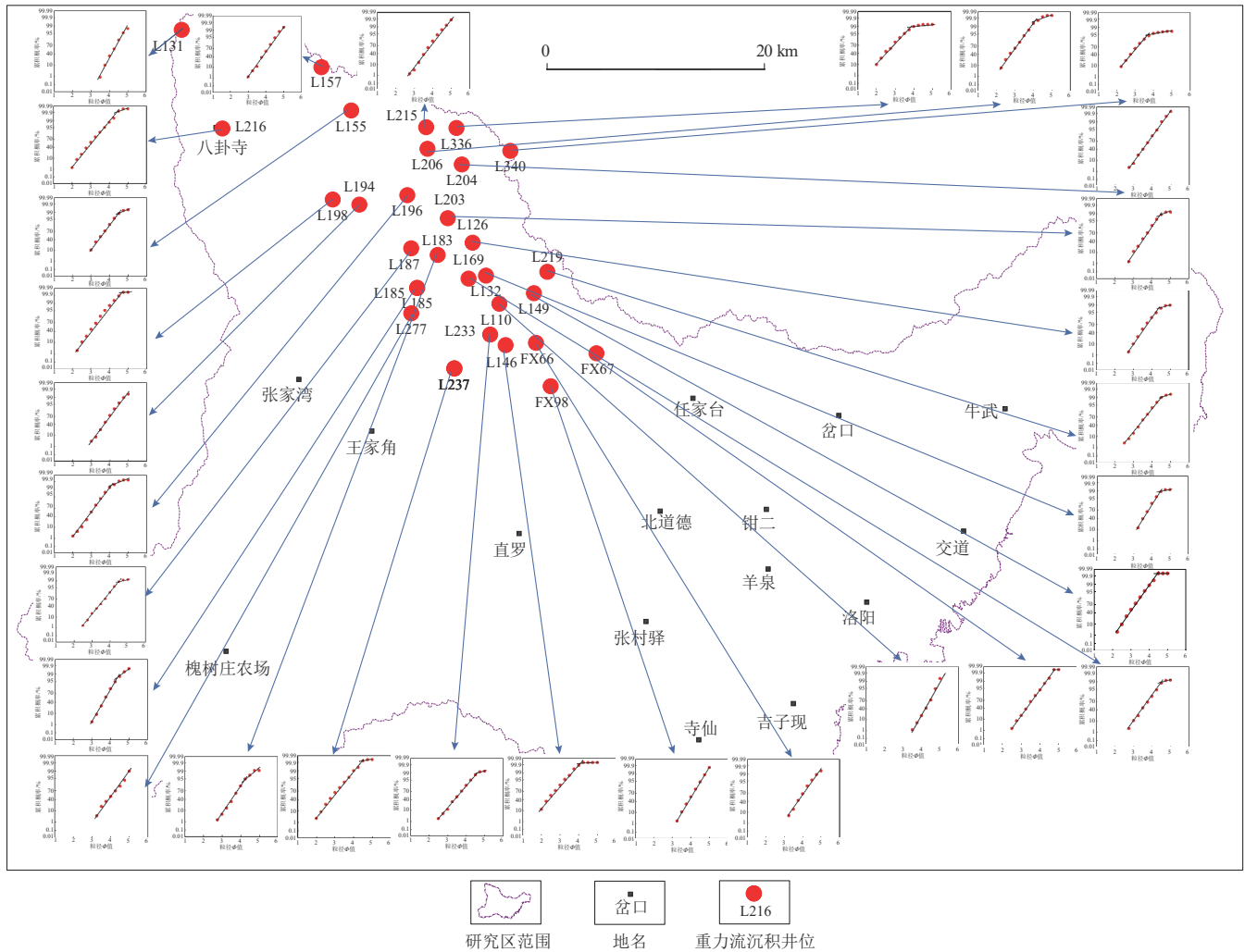


图12 富县地区长8油层组重力流沉积概率累积曲线平面分布

Fig. 12 Map of grain-size cumulative probability curves for gravity-flow deposits in the Chang 8 oil group, Fuxian area

3.2.4 沉积相平面分布

沉积相平面分布图(图14)显示,富县地区长7—长9油层组沉积砂体与传统三角洲沉积砂体展布形态有很大的差异,砂体形状不规则,反映为重力流沉积。长8油层组重力流沉积较7油层组更为发育,重力流水道侧翼与重力水道范围有所增大,而半深湖—深湖泥的范围明显缩小,主要位于研究区西南部(图14c,d)。长9油层组重力流水道的范围明显缩小(图14e,f)。

4 不同重力流类型储层特征及含油性对比

4.1 储层物性对比

根据储层物性对比分析(图15),发现富县地区砂

质碎屑流沉积储层孔隙度相对较高,为1.50%~22.70%,平均值为9.58%,渗透率为 $(0.05 \sim 3.28) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.36 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;而浊流沉积砂岩物性较差,孔隙度为2.88%~14.88%,平均值为5.81%,渗透率为 $(0.07 \sim 0.66) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。二者均为典型的致密储层。

4.2 含油性对比

根据岩心含油性观察结果(图16a),发现研究区含油饱和度为6.97%~87.88%,平均值为60.57%。砂质碎屑流与浊流沉积砂岩的含油级别均以油迹为主,但砂质碎屑流沉积砂岩的含油级别总体高于浊流沉积砂岩,且其干层占比较后者低。另外,砂质碎屑流储层的含油饱和度也明显高于浊流沉积砂岩(图16b)。

荧光薄片观察也表明砂质碎屑流沉积砂岩的含油性好于浊流沉积砂岩(图17)。其中砂质碎屑流储层

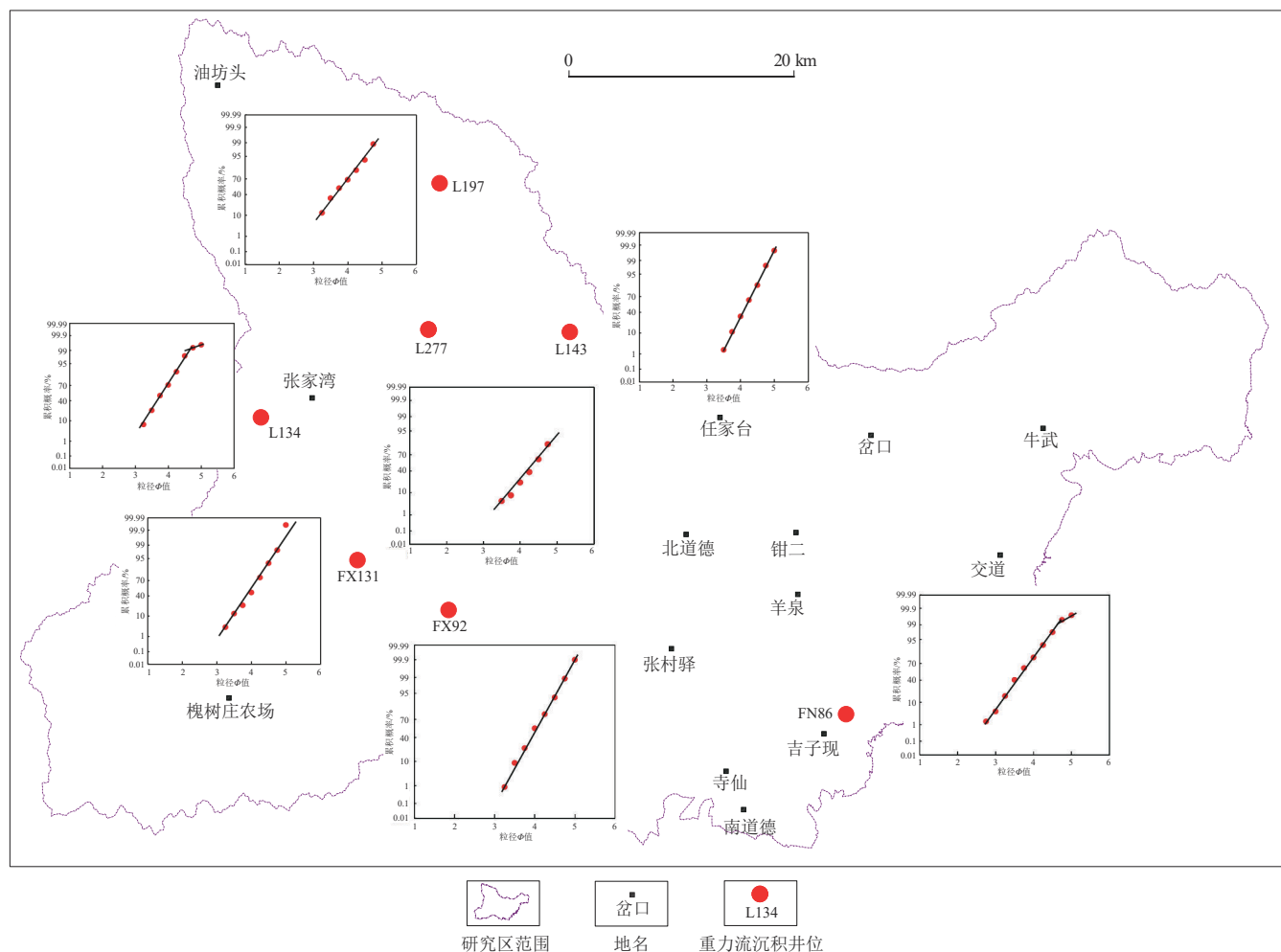


图13 富县地区长9油层组重力流沉积概率累积曲线平面分布

Fig. 13 Map of grain-size cumulative probability curves for gravity-flow deposits in the Chang 9 oil group, Fuxian area

含油面积相对较大,可见油质沥青、胶质沥青和沥青质沥青充填粒间孔和微裂缝,孔隙边缘有连续油膜分布(图17a—c),而浊流储层含油面积相对较小,且主要为油质沥青与胶质沥青充填溶孔和裂缝,孔隙边缘模糊(图17d—f)。

4.3 试油产量

对比研究区长7—长9油层组砂质碎屑流与浊流沉积砂岩的试油产量(图18),可见砂质碎屑流储层试油产量明显较高,为0.30~9.60 m³/d,平均产油量在2.00 m³/d以上;而浊流储层产量较低,为0.10~4.34 m³/d,平均产油量约为1.00 m³/d。

砂质碎屑流之所以较浊流沉积含油性好、产量高,是因为其储层厚度较大、发育块状层理、孔隙度和渗透率也较浊流沉积高,因而储层规模大、连通性好,加之发育在半深湖—深湖区,烃源条件也十分优越,故而有利于规模油气聚集。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地富县地区长7—长9油层组发育砂质碎屑流沉积、浊流沉积和滑动—滑塌沉积3类重力流沉积,各层段重力流沉积均遍及全区。砂质碎屑流沉积砂体厚度大,以块状层理和泥岩撕裂屑为标志;浊流沉积厚度薄,可观察到明显的鲍玛序列;滑动—滑塌沉积以揉皱变形、包卷层理和阶梯状断层为特征。

2) 研究区长7—长9油层组重力流沉积的粒度概率累积曲线具有为3种类型:一段式、短尾两段式和高悬两段式。前两者均存在偏粗型和偏细型两类,偏粗型指示砂质碎屑流沉积,偏细型则指示浊流沉积;而高悬两段式曲线因粗端粒度偏粗,粒径 Φ 值分布在2~3,跳跃次总体占比相对较低,一般为70%~80%,悬浮次总体含量相对较高,占15%~30%,因而也指示为砂质碎屑流沉积。

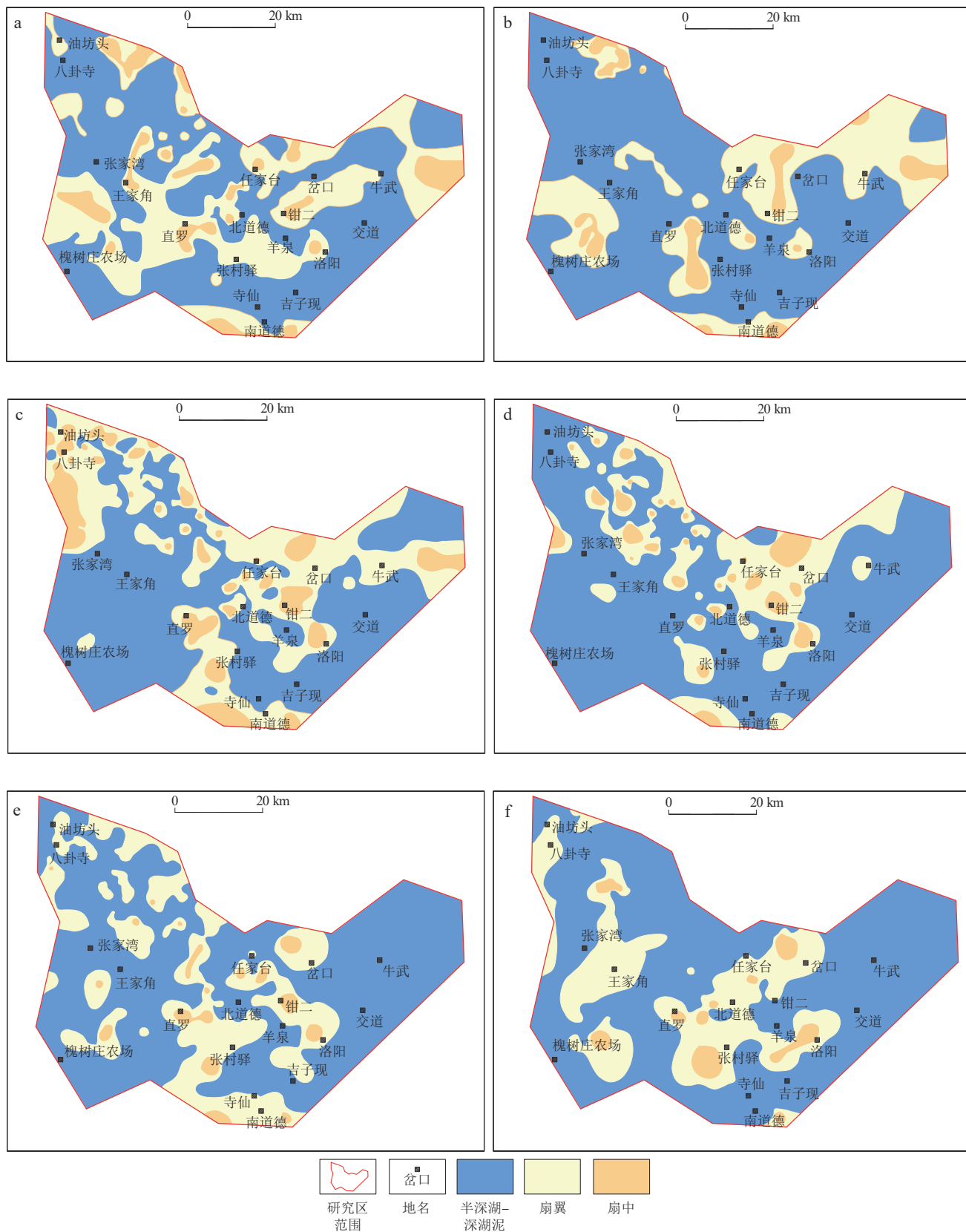


图14 富县地区长7—长9油层组重力流沉积平面分布

Fig. 14 Maps showing the distributions of gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area

a. 长7¹油层亚组; b. 长7²油层亚组; c. 长8¹油层亚组; d. 长8²油层亚组; e. 长9¹油层亚组; f. 长9²油层亚组

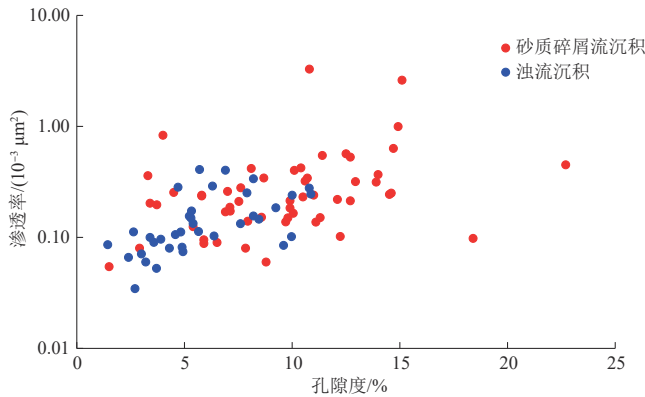


图 15 富县地区长7—长9油层组重力流沉积孔隙度和渗透率交汇图

Fig. 15 Porosity vs. permeability cross plot for gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area

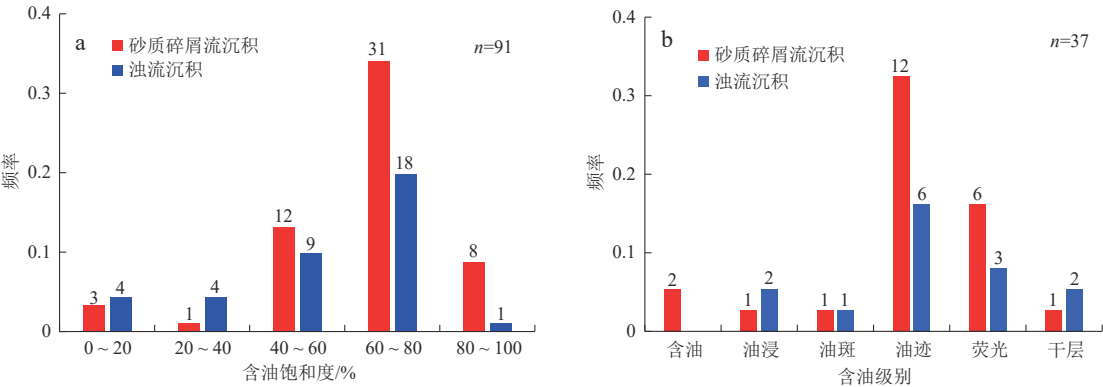


图 16 富县地区长7—长9油层组不同重力流沉积含油饱和度频率分布直方图(a)和含油级别柱状图(b)

Fig. 16 Histogram showing the frequency distribution of oil saturation (a) and bar chart illustrating oil-bearing grades (b) for different types of gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area
(*n*为样本个数。)

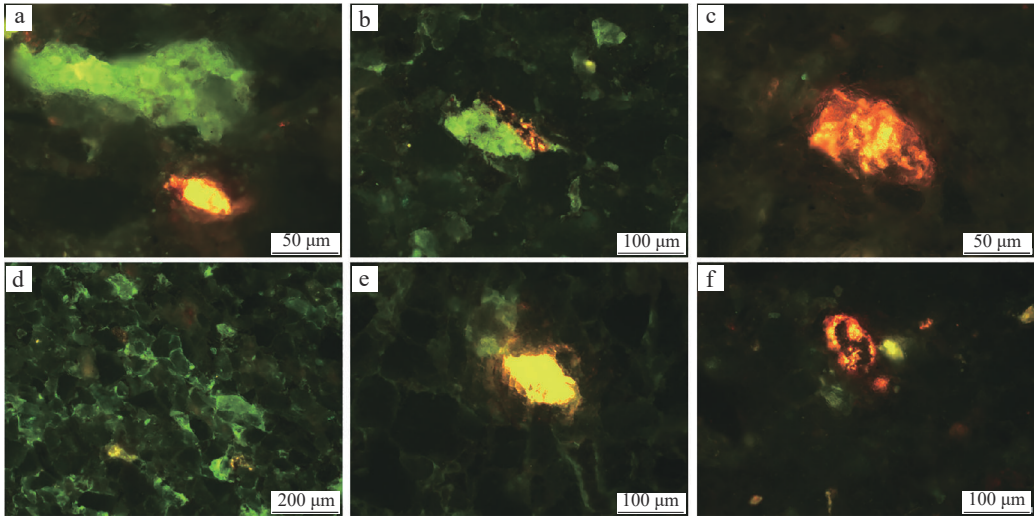


图 17 富县地区长8—长9油层组重力流沉积砂岩含油性荧光薄片显微照片

Fig. 17 Micrographs of fluorescence thin sections showing the oil-bearing properties of sandstones in gravity-flow deposits in the Chang 8-9 oil groups, Fuxian area

a. 细砂岩,油迹,油质沥青和胶质沥青,砂质碎屑流,L235井,埋深1 481.14 m,长8油层组;b. 粉-细砂岩,油迹,油质沥青和胶质沥青,砂质碎屑流,L256井,埋深1 462.02 m,长8油层组;c. 含泥粉砂岩,油迹,沥青质沥青,砂质碎屑流,L277井,埋深1 566.05 m,长9油层组;d. 粉砂岩,含油,油质沥青,浊流,L231井,埋深1 640.92 m,长8油层组;e. 细砂岩,油迹,油质沥青,浊流,L372井,埋深1 738.36 m,长8油层组;f. 泥质粉砂岩,含油,胶质沥青和沥青质沥青,浊流,L256井,埋深1 472.50 m,长9油层组

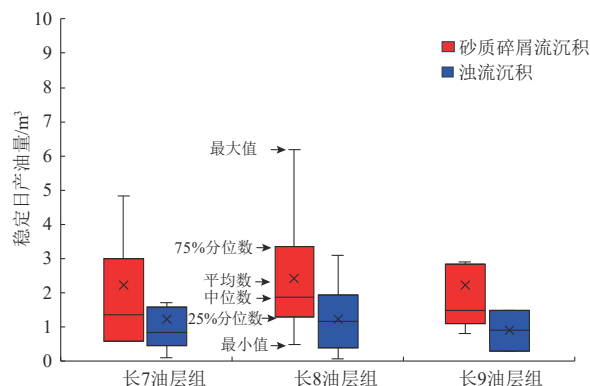


图18 富县地区长7—长9油层组重力流沉积试油产量对比

Fig. 18 Comparison of well test-derived daily oil production of gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Fuxian area

3) 砂质碎屑流沉积砂岩较浊流沉积砂岩储层品质佳、含油性好、产量高,是研究区致密油勘探开发的主要目标。

参 考 文 献

- [1] KUENEN P H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. The Journal of Geology, 1950, 58 (2): 91-127.
- [2] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 1-168.
- [3] MIDDLETON G V, HAMPTON M A. Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition [C]//MIDDLETON G V, BOUMA A H. Turbidites and Deep Sea Sedimentation: Short Course Lecture Notes Part I California: Los Angeles, 1973: 1-38.
- [4] LOWE D R. Sediment gravity flows; II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. Journal of Sedimentary Research, 1982, 52(1): 279-297.
- [5] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents; are they sandy debris flows? [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66 (1): 2-10.
- [6] 李相博, 刘化清, 完颜容, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂质碎屑流储集体的首次发现[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 19-21.
LI Xiangbo, LIU Huaqing, WANYAN Rong, et al. First discovery of the sandy debris flow from the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21 (4): 19-21.
- [7] 李相博, 付金华, 陈启林, 等. 砂质碎屑流概念及其在鄂尔多斯盆地延长组深水沉积研究中的应用[J]. 地球科学, 2011, 26(3): 286-294.
LI Xiangbo, FU Jinhua, CHEN Qilin, et al. The concept of sandy debris flow and its application in the Yanchang Formation deep water sedimentation of the Ordos Basin [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(3): 286-294.
- [8] 鲜本忠, 安思奇, 施文华. 水下碎屑流沉积: 深水沉积研究热点与进展[J]. 地质论评, 2014, 60(1): 39-51.
- [9] XIAN Benzong, AN Siqu, SHI Wenhua. Subaqueous debris flow: Hotspots and advances of deep-water sedimentation [J]. Geological Review, 2014, 60(1): 39-51.
- [9] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 10-20.
- [10] YANG Renchao, JIN Zhijun, SUN Dongsheng, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 10-20.
- [10] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 超临界沉积物重力流形成演化及特征[J]. 石油学报, 2017, 38(6): 607-621.
- [10] CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong, et al. Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity-flow [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38 (6): 607-621.
- [11] 潘树新. 大型坳陷湖盆深水重力流研究——以松辽盆地青山口组为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 45-80.
- [11] PAN Shuxin. Deep-water gravity deposits in Songliao terrestrial basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 45-80.
- [12] 刘化清, 冯明, 郭精义, 等. 坳陷湖盆斜坡区深水重力流水道地震响应及沉积特征——以松辽盆地LHP地区嫩江组一段为例[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(3): 1-12.
- [12] LIU Huaqing, FENG Ming, GUO Jingyi, et al. Seismic reflection and sedimentary characteristics of deep-water gravity flow channels on the slope of lacustrine depression basin: First member of Nenjiang Formation in LHP area, Songliao Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(3): 1-12.
- [13] 王冠民, 庞小军, 黄晓波, 等. 渤海海域辽中凹陷南部古近系东营组三段重力流砂岩优质储层特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 81-95.
- [13] WANG Guanmin, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, et al. Characteristics and origin of high-quality gravity-flow sandstone reservoirs in the 3rd member of the Dongying Formation, southern Liaozhong Sag, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 81-95.
- [14] 耿军阳, 鲜本忠, 刘振献, 等. 深水重力流沉积模拟研究进展与展望[J]. 沉积学报, 2025, 43(3): 827-845.
- [14] GENG Junyang, XIAN Benzong, LIU Zhenxian, et al. Progress and prospects for simulating deep-water gravity flow sedimentation [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(3): 827-845.
- [15] 孙宁亮, 钟建华, 王书宝, 等. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组深水重力流沉积特征及其石油地质意义[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 299-314.
- [15] SUN Ningliang, ZHONG Jianhua, WANG Shubao, et al. Sedimentary characteristics and petroleum geologic significance of deep-water gravity flow of the Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2017, 19(2): 299-314.
- [16] 冉逸轩, 周翔. 鄂尔多斯盆地西南部延长组6段重力流沉积特征及其油气地质意义[J]. 沉积学报, 2020, 38(3): 571-579.
- [16] RAN Yixuan, ZHOU Xiang. Sedimentary characteristics and petroleum geological significance of the Chang 6 gravity flow in the

- southwest Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 571–579.
- [17] 祝海华, 张秋霞, 董国栋, 等. 鄂尔多斯盆地长7段重力流砂岩长石溶蚀特征及控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(1): 102–113.
- ZHU Haihua, ZHANG Qiuxia, DONG Guodong, et al. Characteristics and control factors of feldspar dissolution in gravity flow sandstone of Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(1): 102–113.
- [18] 徐黎明, 郭芪恒, 刘元博, 等. 鄂尔多斯盆地长7₃亚段深水重力流砂岩储层特征及控制因素——以华池地区CY1井为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(12): 1797–1809.
- XU Liming, GUO Qiheng, LIU Yuanbo, et al. Characteristics and controlling factors of deep-water gravity flow sandstone reservoir in the Chang 7₃ sub-member in Ordos Basin: Case study of Well CY1 in Huachi area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(12): 1797–1809.
- [19] 张家强, 李士祥, 李宏伟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7油层组湖盆远端重力流沉积与深水油气勘探——以城页水平井区长73小层为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(5): 570–587.
- ZHANG Jiaqiang, LI Shixiang, LI Hongwei, et al. Gravity flow deposits in the distal lacustrine basin of the 7th reservoir group of Yanchang Formation and deepwater oil and gas exploration in Ordos Basin: A case study of Chang 73 sublayer of Chengye horizontal well region [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(5): 570–587.
- [20] 张倚安, 李士祥, 田景春, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7段深水重力流沉积类型[J]. *沉积学报*, 2021, 39(2): 297–309.
- ZHANG Yian, LI Shixiang, TIAN Jingchun, et al. Sedimentation types of deep-water gravity flow, Chang 7 member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 297–309.
- [21] 霍宏亮, 刘成林, 李闻达, 等. 沉积和成岩作用对湖相重力流致密砂岩储层质量的影响——以鄂尔多斯盆地合水地区长7段为例[J]. *地质论评*, 2024, 70(6): 2411–2427.
- HUO Hongliang, LIU Chenglin, LI Wenda, et al. Effect of sedimentation and diagenesis on the quality of lacustrine gravity flow tight sandstone reservoirs—A case study of the Chang-7 Member in Heshui area, Ordos Basin [J]. *Geological Review*, 2024, 70(6): 2411–2427.
- [22] 蒋文琦, 冯有良, 邹才能, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7₃亚段细粒重力流沉积特征及其主要影响因素[J]. *地球科学*, 2025, 50(6): 2209–2226.
- JIANG Wenqi, FENG Youliang, ZOU Caineng, et al. Depositional character and influencing factors of fine-grained gravity flow of Chang 7₃ submember in Longdong area of Ordos Basin [J]. *Earth Science*, 2025, 50(6): 2209–2226.
- [23] 肖文华, 杨军, 严宝年, 等. 鄂尔多斯盆地环庆地区三叠系长8致密砂岩储层特征及成藏主控因素[J]. *岩性油气藏*, 2025, 37(3): 23–32.
- XIAO Wenhua, YANG Jun, YAN Baonian, et al. Characteristics and main controlling factors of Triassic Chang 8 tight sandstone reservoir in Huanqing area, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2025, 37(3): 23–32.
- [24] 邓秀芹, 庞锦莲, 孙勃. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长10—长8段沉积演化特征[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 1078–1090.
- DENG Xiuqin, PANG Jinlian, SUN Bo. Evolution characteristics of Ordos Basin in sedimentary period of Chang 10–Chang 8 member of Yanchang Formation [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(6): 1078–1090.
- [25] 王林, 吕奇奇, 张严, 等. 鄂尔多斯盆地西南部长7油层组深水重力流沉积岩相特征及分布模式[J]. *沉积学报*, 2025, 43(1): 154–168.
- WANG Lin, LYU Qiqi, ZHANG Yan, et al. Lithofacies characteristics and distribution patterns of deep water gravity flow deposits in the Chang 7 oil member in the southwest Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(1): 154–168.
- [26] 张龙飞, 白玉彬, 闫新智, 等. 吴起一定边地区延长组长7段深水沉积特征及沉积模式[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 40(3): 12–25.
- ZHANG Longfei, BAI Yubin, YAN Xinzhi, et al. Deep-water sedimentary characteristics and sedimentary model of Chang 7 member of Yanchang Formation in Wuqi-Dingbian area [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2025, 40(3): 12–25.
- [27] 姜龙燕, 钱门辉, 何发岐, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长7页岩油特征及其主控因素[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(5): 941–953.
- JIANG Longyan, QIAN Menhui, HE Faqi, et al. Characteristics and main controlling factors of Chang 7 shale oil in Triassic Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(5): 941–953.
- [28] 何发岐, 朱建辉, 齐荣, 等. 基于天文周期等时格架预测细粒沉积岩相展布——以鄂尔多斯盆地富县地区三叠系长7段为例[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(5): 927–940.
- HE Faqi, ZHU Jianhui, QI Rong, et al. Prediction of fine-grained sedimentary lithofacies distribution based on astronomical cycle isochronous lattice: A case study of Triassic Chang 7 member of Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(5): 927–940.
- [29] 陈飞, 胡光义, 孙立春, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区上三叠统延长组砂质碎屑流沉积特征及其油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 1042–1052.
- CHEN Fei, HU Guangyi, SUN Lichun, et al. Sedimentary characteristics and the significance of petroleum exploration of sandy debris flows of Yanchang Formation of the Upper Triassic, Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(6): 1042–1052.
- [30] 田媛, 钟建华, 王书宝, 等. 鄂尔多斯盆地富县探区三叠系延长组震积岩及其地质意义[J]. *古地理论*, 2015, 17(4): 541–552.
- TIAN Yuan, ZHONG Jianhua, WANG Shubao, et al. Seismites and their geological significances of the Triassic Yanchang

- Formation in Fuxian exploration area, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2015, 17(4): 541-552.
- [31] 张军, 白玉彬, 闫新智, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区长7段深水重力流沉积及勘探意义[J/OL]. 沉积学报: 1-21[2025-05-29]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>. ZHANG Jun, BAI Yubin, YAN Xinzhi, et al. Deep-water gravity flow sedimentation and exploration significance of Chang 7 member in Fuxian area, Ordos Basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-21 [2025-05-29]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>.
- [32] 周世琪. 陕北富县地区长8-长9储盖层评价及其控油性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024. ZHOU Shiqi. Study on the evaluation of Chang 8-Chang 9 reservoir-cap and its oil control in Fuxian area of northern Shaanxi [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.
- [33] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1-479. ZHU Xiaomin. Sedimentary petrology [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1-479.
- [34] 尹虎, 屈红军, 孙晓晗, 等. 鄂尔多斯盆地东南部三叠系长7油层组深水沉积特征及演化规律[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(5): 145-155. YIN Hu, QU Hongjun, SUN Xiaohan, et al. Characteristics of deep-water deposits and evolution law of Triassic Chang 7 reservoir in southeastern Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(5): 145-155.
- [35] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 95-105. HE Zixin. Evolution and hydrocarbon in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 95-105.
- [36] 许璟, 葛锦云, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区长7油层组泥页岩孔隙结构定量表征与动态演化过程[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 292-307. XU Jing, GE Yunjin, HE Yonghong, et al. Quantitative characterization and dynamic evolution of pore structure in shale reservoirs of Chang 7 oil layer group in Yanchang area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 292-307.
- [37] 蒋杨, 弓虎军, 蒲仁海. 鄂尔多斯盆地甘泉—富县地区延长组长9—长7段烃源岩地球化学特征及长8致密油源对比[J]. 沉积与特提斯地质, 2024, 44(3): 656-670. JIANG Yang, GONG Hujun, PU Renhai. Geochemical characteristics of source rocks in the Chang 9-Chang 7 members and their correlation with the tight oil sources of Chang 8 member in the Ganquan-Fuxian area, Ordos Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024, 44(3): 656-670.
- [38] 黄彦杰, 耿继坤, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组长6、长7段原油地球化学特征及油源对比[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 281-288. HUANG Yanjie, GENG Jikun, BAI Yubin, et al. Geochemical characteristics and oil-source correlation of crude oils in 6th and 7th members of Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(2): 281-288.
- [39] 孙建博, 石彬, 郭超, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长7₃亚段页岩油储层特征与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 79-91. SUN Jianbo, SHI Bin, GUO Chao, et al. Characteristics of shale oil reservoir and exploration prospects in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 79-91.
- [40] 姜辉. 浊流沉积的动力学机制与响应[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 428-435. JIANG Hui. Dynamical mechanism and depositional responses of turbidity current sedimentation[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 428-435.
- [41] 葛毓柱, 钟建华, 李勇, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长8-长6油层组类眼状构造成因探讨[J]. 古地理学报, 2015, 17(6): 797-804. GE Yuzhu, ZHONG Jianhua, LI Yong, et al. Genetic discussion about eye-like structure of the Chang 8-6 intervals of Triassic Yanchang Formation in Fuxian area, Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2015, 17(6): 797-804.
- [42] SHANMUGAM G. New perspectives on deep-water sandstones: Implications[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 316-324.
- [43] 李智勇, 徐云泽, 邓静, 等. 陆相湖泊深水砂质碎屑流与浊流的微观沉积特征及区分方法——以鄂尔多斯盆地延长组长7段为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 415-423. LI Zhiyong, XU Yunze, DENG Jing, et al. Microscale sedimentary characteristics and distinguishing methods for deep-water sandy debris flow and turbidity flow in continental lakes: A case study of seventh member of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(3): 415-423.
- [44] 陈伟涛, 赵靖舟, 高振东, 等. 鄂尔多斯盆地志丹地区三叠系延长组长7-长9深水重力流沉积的发现及其控油性分析[待刊]. CHEN Weitao, ZHAO Jingzhou, GAO Zhendong, et al. Discovery of deep-water gravity flow deposits and their hydrocarbon control in the Triassic Chang 7-Chang 9 intervals of Yanchang Formation, Zhidan area, Ordos Basin [in press].
- [45] 何一鸣, 何幼斌, 李华, 等. 深水斜坡区重力流水道沉积形成机理分析: 以鄂尔多斯盆地西北缘乌海地区拉什仲组为例[J/OL]. 地质学报: 1-17[2025-06-10]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025050>. HE Yiming, HE Youbin, LI Hua, et al. Formation mechanism of gravity flow channel deposits in deep-water slope area: A case study of the Lashizhong Formation in Wuhai area, northwestern margin of Ordos Basin [J/OL]. Acta Geologica Sinica: 1-17 [2025-06-10]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025050>.
- [46] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.

(编辑 许诺)